

文章编号: 1001-3806(2019)01-0058-05

## 金属光栅提高蓝光 LED 提取效率的研究

赵建伟<sup>1</sup>, 江孝伟<sup>1,2</sup>, 方晓敏<sup>1</sup>, 赵燕娟<sup>1</sup>, 葛正阳<sup>1</sup>

(1. 衢州职业技术学院 信息工程学院, 衢州 324000; 2. 北京工业大学 电子信息与控制工程学院 光电子技术实验室, 北京 100124)

**摘要:** 为了提高发光二极管(LED)的光提取效率,并比较不同光栅形状对LED光提取效率的影响,采用严格耦合波法优化了与矩形、等腰三角形、等腰梯形光栅分别集成的倒装LED,使它们出光面透射率达到最优,随后使用有限时域差分法模拟计算它们的光提取效率。经过模拟计算和理论分析可得3种不同结构LED最优光栅参量(光栅占空比 $f$ 、光栅周期 $p$ 、光栅厚度 $h$ )和过渡层厚度 $d$ 分别是: $f=0.35, p=150\text{nm}, h=80\text{nm}, d=190\text{nm}$ ;  $f=0.45, p=175\text{nm}, h=80\text{nm}, d=190\text{nm}$ ;  $f=0.7, p=150\text{nm}, h=80\text{nm}, d=190\text{nm}$ 。结果表明,3种最优的LED结构在波长 $0.4\mu\text{m}\sim 0.5\mu\text{m}$ 范围内,矩形光栅倒装LED和等腰三角形光栅倒装LED出光面透射率相同,等腰梯形光栅倒装LED出光面透射率最低;由于光透射率最低,导致等腰梯形光栅倒装LED光提取效率较低,最高仅为58.07%,但是由于等腰三角形光栅倒装LED特殊的光栅形状加上高的光透射率,其光提取效率可以达到77.75%。此研究可以为制备高光提取效率LED提供理论方法指导。

**关键词:** 光栅;光提取效率;严格耦合波法;有限时域差分法;发光二极管;透射率;倒装

中图分类号: TN383

文献标志码: A

doi:10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2019.01.012

## Study on improving the extraction efficiency of blue light LED by metal gratings

ZHAO Jianwei<sup>1</sup>, JIANG Xiaowei<sup>1,2</sup>, FANG Xiaomin<sup>1</sup>, ZHAO Yanjuan<sup>1</sup>, GE Zhengyang<sup>1</sup>

(1. College of Information Engineering, Quzhou College of Technology, Quzhou 32400, China; 2. Laboratory of Opto-electronics Technology, College of Electronic Information and Control Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** In order to improve the light extraction efficiency of light-emitting diodes (LED), the influences of different grating shapes on the light extraction efficiency of LED were compared. The flip chip LEDs, which was integrated with rectangle, isosceles triangle and isosceles trapezoidal grating, were optimized by rigorous coupled wave method to make the transmittance of the light-exiting surface best. Finite-difference time-domain method was used to simulate the efficiency of light extraction. After simulation calculation and theoretical analysis, the optimal grating parameters (grating duty ratio  $f$ , grating period  $p$ , grating thickness  $h$ ) and transition layer thickness  $d$  of the LEDs with 3 different structures can be obtained:  $f=0.35, p=150\text{nm}, h=80\text{nm}, d=190\text{nm}$ ;  $f=0.45, p=175\text{nm}, h=80\text{nm}, d=190\text{nm}$ ;  $f=0.7, p=150\text{nm}, h=80\text{nm}, d=190\text{nm}$ . The results show that, in the wavelength of  $0.4\mu\text{m}$  to  $0.5\mu\text{m}$ , the flip-chip LED of the rectangular grating and the flip-chip LED of the isosceles triangle grating have the same transmittance. The flip-chip LED of The isosceles trapezoidal grating has the lowest transmittance. Because of the lowest transmittance, the light extraction efficiency of the flip-chip LED of the isosceles trapezoidal grating is lower and the highest is only 58.07%. The optical extraction efficiency of the flip-chip LED of the isosceles triangle grating with special grating shape can reach 77.75%. The study can provide theoretical guidance for manufacturing high light extraction efficiency LED in the future.

**Key words:** grating; light extraction efficiency; rigorous coupled wave analysis; finite-difference time-domain method; light-emitting diode; transmissivity; flip chip

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61650404);浙江省教育厅科研资助项目(Y201738091);衢州市科技计划资助项目(2014Y017;2015Y018;2017G16);衢州职业技术学院新苗人才计划校级资助项目(QZY17X013)

作者简介:赵建伟(1965-),男,硕士,副教授,主要从事半导体光电子器件的研究。

E-mail:diankejiang@126.com

收稿日期:2018-01-29;收到修改稿日期:2018-03-22

## 引言

发光二极管(light-emitting diode, LED)作为一种替代荧光灯和白炽灯的新一代光源<sup>[1]</sup>,由于具有体积小、能耗低、寿命长、效率高等特点吸引了很多的关注<sup>[2-4]</sup>。现今在LED研究领域上更多的是提高其发光效率<sup>[5]</sup>。LED的发光效率是由光提取效率和内量子效率决定<sup>[6]</sup>。随着技术的发展,材料生长技术已经越

来越精湛,内量子效率可以几乎达到 100%<sup>[7]</sup>。因此现今主要研究内容是如何提高 LED 的光提取效率。光子晶体技术<sup>[8]</sup>、光栅技术<sup>[9]</sup>、表面粗化技术<sup>[10]</sup>、仿生技术<sup>[11]</sup>、倒装技术<sup>[12]</sup>等均被利用在提高 LED 光提取效率上。

表面粗化技术虽然可以提高光提取效率,但是该技术容易增加 GaN 层出光面的缺陷,甚至会破坏有源区降低 LED 的内量子效率;LED 倒装技术自 2001 年被提出后已经被商业化,不过倒装 LED 的光提取效率对 P-GaN 层厚度非常敏感,P-GaN 层厚度微弱的变化都会导致 LED 光提取效率大幅度的降低或升高;在 LED 出光面制作类蛾眼结构已经被证实对提高 LED 光提取效率确实有很多帮助,可是该技术对工艺要求非常高,不利于产业化;光子晶体技术和光栅技术分别是用光子禁带效应和光栅衍射效应或表面等离子激元来提高 LED 的光提取效率,相对于光栅技术,光子晶体技术所需成本要高,因此基于生产成本考虑,使用光栅技术相对而言是一种更为有效合理的技术在提高 LED 的光提取效率上。

虽然已知在 LED 出光面刻蚀一层光栅可以提高 LED 的光提取效率,但是不同的人会选择不同的光栅形状,而且经过研究,不同的光栅形状实现的光提取效率是不同的。LI 等人将等腰三角形光栅与正装 LED 集成,经过对器件的优化实现了 25% 的光提取效率<sup>[13]</sup>。SEOK 等人使用倒装 LED 与等腰三角形光栅集成,在中心波长 450nm 上实现了 66% 的光提取效率<sup>[2]</sup>。长春理工大学 SUN 教授团队使用梯形光栅与正装 LED 集成,对器件优化后实现的光提取效率是无光栅结构 LED 的 4.8 倍<sup>[14]</sup>;同年他们还将半圆形光栅与正装 LED 集成,通过理论计算得到的光提取效率是无光栅结构的 6 倍<sup>[15]</sup>。

上述研究分别将不同的光栅形状集成于倒装 LED,虽然都实现了光提取效率的提高,不过光提取效率仍然不高,还有优化的空间。并且根据作者所在课题组可知,目前很少就不同光栅形状对光提取效率影响进行统一分析,为此本文中基于倒装 LED 研究了等腰梯形、等腰三角形、矩形光栅对 LED 光提取效率的影响。通过优化对比可知,等腰三角形光栅对提高 LED 光提取效率最为明显,最高可达 77.75%,是无光栅结构正装 LED 的 7 倍,相比于其它文献报道有明显的提升。而等腰梯形光栅对光提取效率提高最少,最高仅能实现 58.07%。这也表明在刻蚀矩形光栅时,一定要精准,以免刻蚀成梯形光栅降低光的提取效率。

## 1 器件结构

图 1 展示了不同形状光栅在普通倒装 LED 上的集成情况。图 1a ~ 图 1c 均是在图 1d 基础上集成的不同形状的光栅,光栅由金属 Al 刻蚀而成。图 1d 中是普通的倒装 LED,器件的中心波长为 470nm,它由电极、P 掺杂的 GaN 层(折射率  $n_{\text{P-GaN}} = 2.45$ , 280nm)、有源区(multiple quantum wells, MQWs) InGaN/GaN (3nm)、N 掺杂的 GaN 层( $n_{\text{N-GaN}} = 2.42$ , 3000nm)组成。 $p$  是光栅周期, $h$  是光栅厚度, $s$  是光栅条宽,光栅占空比  $f = s/p$ , $d$  是过渡层  $\text{SiO}_2$  ( $n_{\text{SiO}_2} = 1.45$ ) 的厚度。图 1b 中等腰梯形的上边宽度  $s_1$  是底边宽带  $s$  的一半,图 1c 中的光栅是等腰三角形光栅。

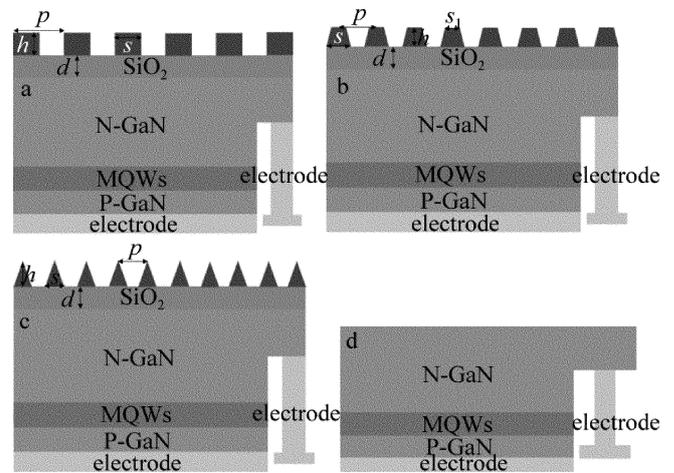


Fig. 1 a—rectangular grating flip-chip LED b—isosceles trapezoidal grating flip-chip LED c—isosceles triangle grating flip-chip LED d—normal flip-chip LED

本文中选择的倒装 LED,是因为正装 LED 的正面电极会吸收一部分的出射光从而降低 LED 的发光效率,但是倒装 LED 却没有正面电极吸收出射光,而且背面电极在导通电流的同时还可以加厚作为背面反射镜,这可以提高 LED 光的光提取效率,另外由于有更多的光子逸出 LED,则不会因为困在器件内作为损耗来降低 LED 的寿命<sup>[16]</sup>。

## 2 器件优化

优化光栅参量和过渡层厚度,可以使集成的 3 种不同光栅的倒装 LED 都能实现高透射率。因为 LED 出光面透射率越高,理论上光提取效率越高<sup>[17]</sup>。为了使这 3 种不同结构的 LED 透射率达到最优,可通过严格耦合波法优化 3 种不同的倒装 LED 结构。

### 2.1 光栅占空比对透射率的影响

当光栅周期  $p = 110\text{nm}$ 、光栅厚度  $h = 110\text{nm}$ 、过渡

层厚度  $d = 180\text{nm}$  时,3 种不同结构的倒装 LED 随着占空比的增加,透射率均是先增大后减小,因此它们都存在一个最优的光栅占空比,如图 2 所示。矩形光栅 LED 最优占空比  $f_{\text{rectangle}} = 0.35$ , 等腰梯形光栅 LED 最优占空比  $f_{\text{trapezium}} = 0.45$ , 等腰三角形光栅 LED 最优占空比  $f_{\text{triangle}} = 0.7$ 。通过图 2 可以发现,虽然 3 种不同结构的 LED 存在不同最优占空比,但是它们在最最优占空比下具有相同的最优透射率,最优透射率均是 0.916。

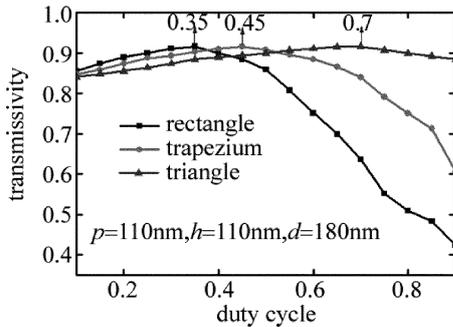


Fig. 2 The influence of grating duty cycle on transmissivity

## 2.2 光栅周期对透射率的影响

在 3 种不同形状光栅最优占空比下,分析了光栅周期对 3 种结构 LED 出光面的透射率的影响,随着光栅周期  $p$  的增加,3 种不同结构 LED 出光面的透射率均是在周期 250nm 以内保持 90% 以上,不过当光栅周期大于 250nm 后,3 种不同结构 LED 的出光面透射率迅速下降,如图 3 所示。其中光栅厚度为 110nm,过渡层厚度为 180nm。

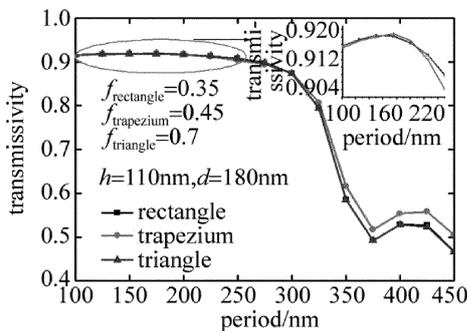


Fig. 3 The influence of grating period on transmissivity

从图中可以发现,在最最优占空比下 3 种结构的 LED 出光面透射率相差并不是很大,甚至矩形光栅 LED 和等腰三角形光栅 LED 出光面透射率几乎相同。对于矩形光栅 LED 和等腰三角形光栅 LED 最优光栅周期均是 150nm,透射率均为 0.9184,但是等腰梯形光栅 LED 最优光栅周期是 175nm,透射率为 0.919。

## 2.3 光栅厚度对透射率的影响

光栅厚度对光栅透射率的影响机理是厚度的变化

引起透射相位的变化,从而导致透射率的变化。光栅厚度对光栅透射率/反射率的影响是周期性的,即透射率随着光栅厚度的增加是先增后减周期性的变化。故将不同形状的光栅与倒装 LED 集成后,LED 的出光面透射率随着光栅厚度变化也是周期性的,如图 4 所示。3 种光栅在最最优占空比下,矩形和等腰三角形光栅 LED 的周期 ( $p_{\text{rectangle}}$  和  $p_{\text{triangle}}$ ) 是 150nm,等腰梯形光栅 LED 周期  $p_{\text{trapezium}} = 175\text{nm}$ ,过渡层厚度  $d = 180\text{nm}$ 。

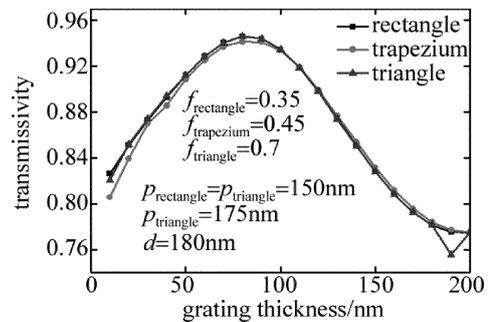


Fig. 4 The influence of grating thickness on transmissivity

光栅厚度从 10nm 变化到 200nm 的过程中,3 种不同结构 LED 出光面都是先递增后递减,3 种结构的最最优光栅厚度刚好相同都是 80nm。与前面相同,矩形光栅 LED 和等腰三角形光栅 LED 出光面透射率随着光栅厚度变化刚好重叠,而对于等腰梯形光栅 LED 在光栅厚度 100nm 之内,其出光面透射率是小于前两种 LED 结构出光面透射率,但是当光栅厚度大于 100nm 后,则其出光面透射率大于前两种 LED 结构。

## 2.4 过渡层厚度对透射率的影响

之所以会在倒装 LED 和金属光栅之间添加一层  $\text{SiO}_2$  过渡层,是因为金属铝和 GaN 层之间折射率相差较大,增加一层过渡层后可以作为缓冲。根据相关文献的介绍,增加过渡层后不仅可以增加光的透射率,还可以增加光的消光比。当 3 种不同结构 LED 的光栅占空比、周期、厚度均在最最优状态下,3 种结构 LED 出光面的透射率随着过渡层厚度的增加实现了类正弦型的变化,如图 5 所示。

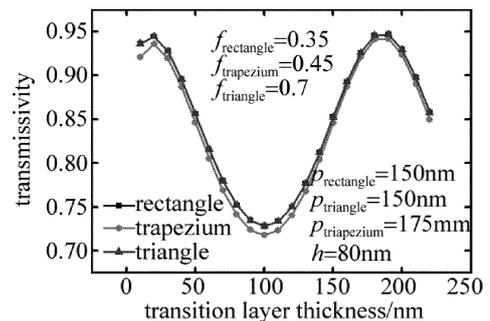


Fig. 5 The influence of transition layer thickness on transmissivity

从图 3 ~ 图 5 中可以发现,当矩形光栅 LED 和等腰三角形光栅 LED 的占空比选择在最优值后,它们的出光面透射率几乎都是一样的,因此这两种光栅形状在实现高透射率上并无区别。而等腰梯形光栅 LED 出光面透射率的变化随着过渡层厚度的变化均小于另外两种结构 LED 出光面透射率。但是 3 种结构的最优过渡层厚度都是 190nm 或者 20nm,为了降低工艺的制作难度,可以选择厚度较厚的过渡层。

### 3 最优 LED 光提取效率

通过对 3 种不同结构 LED 进行优化,使 3 种 LED 不同结构出光面的透射率均达到最大。矩形光栅倒装 LED 最优结构参量是: $p = 150\text{nm}$ ;  $f = 0.35$ ;  $h = 80\text{nm}$ ;  $d = 190\text{nm}$ 。等腰三角形光栅倒装 LED 最优结构参量是: $p = 150\text{nm}$ ;  $f = 0.7$ ;  $h = 80\text{nm}$ ;  $d = 190\text{nm}$ 。等腰梯形光栅倒装 LED 最优结构参量是: $p = 175\text{nm}$ ;  $f = 0.45$ ;  $h = 80\text{nm}$ ;  $d = 190\text{nm}$ 。

通过优化可以知道当矩形光栅 LED 和等腰三角形光栅 LED 在最优占空比下,无论其它光栅参量怎么变化,它们的出光面透射率基本相同,而等腰梯形光栅倒装 LED 出光面的透射率要略小于前面两种结构。图 6 是 3 种最优 LED 对于不同波长时的光透射率变化趋势。从图可以知道,随着波长的增加,透射率也在增加,而且矩形光栅 LED 和等腰三角形光栅 LED 不同波长透射率完全重合。在 3 种最优结构下,除了波长在  $0.4\mu\text{m}$  附近外,其它波段透射率均在 0.80 以上。

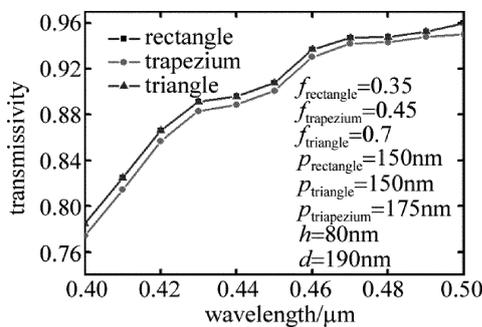


Fig. 6 The influence of wavelength on transmissivity

图 7 是 3 种不同结构的 LED 在最优参量下,利用有限时域差分法计算对于不同波段时 LED 的光提取效率。由于等腰梯形光栅倒装 LED 的出光面透射率要比另外两种的要低,因此其光提取效率确实要低于另外两种结构的 LED。从图中可以看到,等腰梯形光栅 LED 光提取效率在波长为  $0.5\mu\text{m}$  时也就仅有 58.07%。不过由前面可知,矩形光栅 LED 出光面透射率和等腰三角形光栅 LED 出光面透射率几乎是相

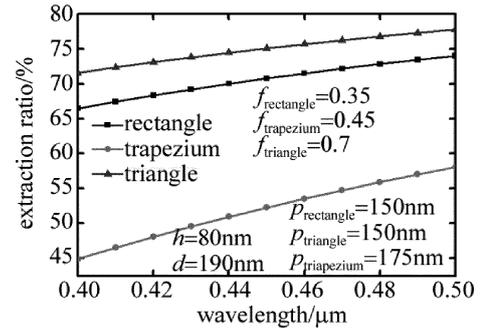


Fig. 7 The influence of wavelength on extraction

等的,但是从图中可以看到,在相同波段下,矩形光栅 LED 光提取效率却低于等腰三角形 LED 光提取效率,这是由光栅形状所决定的。根据参考文献[16]可知,在入射角  $0^\circ \sim 90^\circ$  内,对于等腰三角形光栅无论光子是以什么角度进入,光子都能从光栅逃逸出去,但是矩形光栅却不能,当光子超过一定角度进入光栅,最终还是回到 LED 器件内成为一种内损耗。因此当波长从  $0.4\mu\text{m}$  变化到  $0.5\mu\text{m}$ ,等腰三角形光栅 LED 的光提取效率最低也可以达到 71.54%,最高可达到 77.75%,远大于参考文献[2]中的 66%。

### 4 结论

通过对不同结构 LED(矩形光栅倒装 LED、等腰三角形光栅倒装 LED、等腰梯形光栅倒装 LED)的优化,使 3 种结构 LED 的透射率均能达到最优。通过研究可得 3 种不同结构 LED 最优光栅参量和过渡层厚度分别是: $f = 0.35$ ,  $p = 150\text{nm}$ ,  $h = 80\text{nm}$ ,  $d = 190\text{nm}$ ;  $f = 0.45$ ,  $p = 175\text{nm}$ ,  $h = 80\text{nm}$ ,  $d = 190\text{nm}$ ;  $f = 0.7$ ,  $p = 150\text{nm}$ ,  $h = 80\text{nm}$ ,  $d = 190\text{nm}$ 。在最优光栅参量和过渡层厚度下矩形倒装 LED 和等腰三角形倒装 LED 对于不同波长的透射率相等,而等腰梯形光栅倒装 LED 则要比另外两种 LED 要低。这也就导致了在相同波段下,等腰梯形光栅倒装 LED 的光提取效率要低于另外两种结构的 LED。虽然矩形光栅倒装 LED 在相同波段下是和等腰三角形光栅倒装 LED 相等的,但是由于光栅结构的原因,矩形光栅倒装 LED 的光提取效率要比等腰三角形倒装 LED 低。等腰三角形光栅倒装 LED 最高的光提取效率接近 80%,可达到 77.75%,相比于其它文献有明显的提高。

### 参考文献

- [1] JEON K S, YUH H K, CHOI Y H, *et al.* Comparison of the optimum number of quantum wells in GaN-based blue light-emitting diodes grown on sapphire and Si(111) substrates[J]. *Journal of Nanoscience & Nanotechnology*, 2017, 17(6):4235-4238.

- [2] SEOK M S, YOO S J, CHOE J H, *et al.* Light extraction efficiency enhancement using surface-structured light-emitting diodes with a sub-wavelength coating [J]. *Journal of the Korean Physical Society*, 2016, 68(3):462-466.
- [3] LU L F, YE Zh Ch. Extraction efficiency and polarization induced by photonic crystal structure on GaN-based blue LED[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(11):1113001 (in Chinese).
- [4] JIANG X M, ZHU X Y, LU T, *et al.* Design and implementation of LED indoor light voice communication system[J]. *Laser Technology*, 2014, 38(6):807-812 (in Chinese).
- [5] WANG M, CAO B, HU F Y, *et al.* High linearly polarized light emission from GaN-based LED with patterned dielectric/metal structures [J]. *Proceedings of the SPIE*, 2015, 9524:952414.
- [6] GOU Y Ch, XUAN Y M, HAN Y G, *et al.* A new method to enhance the light extraction efficiency of LED[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2012, 33(1):117-120 (in Chinese).
- [7] XIONG W P, FAN G H, LI Q. Improvement for light extraction efficiency of light emitting diodes[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, 39(11):1956-1960 (in Chinese).
- [8] MATIOLI E, RANGEL E, IZA M, *et al.* High extraction efficiency light-emitting diodes based on embedded air-gap photonic-crystals [J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 96(3):031108.
- [9] YEH W L, FANG C M, CHIOU Y P. Enhancing LED light extraction by optimizing cavity and waveguide modes in grating structures [J]. *Journal of Display Technology*, 2013, 9(5):359-364.
- [10] HUANG H W, KAO C C, CHU J T, *et al.* Improvement of InGaN-GaN light-emitting diode performance with a nano-roughened P-GaN surface[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2005, 17(5):983-985.
- [11] SONG Y M, PARK G C, JANG S J, *et al.* Multifunctional light escaping architecture inspired by compound eye surface structures: From understanding to experimental demonstration[J]. *Optics Express*, 2011, 19(s2):A157-A165.
- [12] WIERER J J, STRIEERWALD D A, KRAMES M R, *et al.* High-power AlGaInN flip-chip light-emitting diodes[J]. *Applied Physics Letters*, 2001, 78(22):3379-3381.
- [13] LI W, YUE Q Y, KONG F M, *et al.* Influence of surface ZnO nanostructures on the light emitting efficiency of GaN-based LED[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, 42(4):409-416 (in Chinese).
- [14] LIU Sh R, WANG L, SUN Y J, *et al.* Improvement on the light extraction efficiency for LED by frustum of a cone array[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(1):0122001 (in Chinese).
- [15] LIU Sh R, WANG L, ZHANG M L, *et al.* Study of light extraction efficiency for LED with square aperture nano-hemisphere array[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2017, 38(12):1668-1674 (in Chinese).
- [16] LIU H. Study on enhancing the light extraction efficiency of GaN-based light emitting diodes by photonic crystal and one dimensional grating structure[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2014:7-8 (in Chinese).
- [17] YI Zh M. Improving light extraction efficiency of GaN-based LEDs by oxide micro & nano structures[D]. Ji'nan: Shandong University, 2014:36-40 (in Chinese).